

Я.В. ПАВЛЮК, аспірант Інституту механіки ім. С.П. Тимошенка НАН України (м. Київ)

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ПОВЗУЧОСТІ НА ОСНОВІ НЕЛІНІЙНОЇ ТЕОРІЇ В'ЯЗКОПРУЖНОСТІ ІЗ НЕЗАЛЕЖНОЮ ВІД ЧАСУ НЕЛІНІЙНІСТЮ

Розглянуто задачу побудови одновимірних визначальних рівнянь нелінійної теорії в'язкопружності. Розв'язок отримано на підставі гіпотези єдиної діаграми деформування виходячи із подібності ізохронних діаграм повзучості та діаграми миттєвого деформування. Побудовано узагальнену реологічну модель. На підставі моделі побудовано одновимірні визначальні рівняння повзучості для нелінійно-в'язкопружних матеріалів. Іл.: 5. Бібліогр.: 14 назв.

Ключові слова: нелінійна теорія в'язкопружності, єдина діаграма деформування, ізохронні діаграми повзучості, діаграма миттєвого деформування, реологічна модель, повзучість, нелінійно – в'язкопружні матеріали.

Постановка проблеми і аналіз літератури. Відомо, що повзучість більшості композитних і полімерних матеріалів реалізується в нелінійній області деформування. Ця область характеризується не співпаданням дослідних кривих податливості і відповідно відсутністю єдиної функції повзучості. При цьому в залежності від матеріалу і умов навантаження може виконуватись або подібність кривих повзучості або подібність ізохронних діаграм повзучості. На даний час опубліковано багато робіт, присвячених побудові нелінійних моделей спадкового типу. Деякі із цих моделей, методи визначення матеріальних констант моделей, а також отримані на їх основі результати обговорюються в [1 – 4]. Однією з найбільш обґрунтованих моделей є нелінійна модель в'язкопружності Работнова [5, 6], основне рівняння якої побудоване виходячи із умови подібності ізохронних діаграм повзучості. В роботі [7] умова подібності ізохронних діаграм повзучості розширена за рахунок введення до подібних ізохрон діаграми миттєвого деформування, як ізохрони для нульового моменту часу, яка визначає нелінійність моделі. На основі цієї моделі розв'язується задача із розрахунку деформацій нелінійної повзучості деяких нелінійно-в'язкопружних полімерних і композитних матеріалів при стаціонарних режимах навантаження.

В [1 – 4, 8, 10 – 12] – приведені нелінійні моделі повзучості спадкового типу. В [5, 6, 9, 14] – розглядається нелінійна модель Работнова. В [7] – приведено розширену нелінійну модель Работнова. В [13] – викладено метод мінімізації функціоналу.

Мета статті – вирішення задачі із моделювання нелінійних процесів повзучості та релаксації напружень в'язкопружних матеріалів на основі нелінійної теорії в'язкопружності із незалежною від часу нелінійністю.

Основні співвідношення. Постановка задачі дослідження. Залежність між деформаціям, напруженнями і часом для нелінійно-в'язкопружних матеріалів, виходячи із розширеної умови подібності ізохронних діаграм, задається в одновимірному випадку рівняннями:

$$\begin{aligned}\varphi_0(\varepsilon(t)) &= \sigma(t) + \lambda \int_0^t K(t-\tau) \sigma(\tau) d\tau; \\ \sigma(t) &= \varphi_0(\varepsilon(t)) - \lambda \int_0^t R(t-\tau) \varphi_0(\varepsilon(\tau)) d\tau,\end{aligned}\quad (1)$$

де $\varepsilon(t)$, $\varepsilon(\tau)$ – повна деформація, що включає пружну складову ε^e і деформацію повзучості $\varepsilon^c(t)$ в моменти часу t і τ ; $\sigma(t)$, $\sigma(\tau)$ – діюче напруження в моменти часу t і τ ; $\varphi_0(\cdot)$ – функція, що задає діаграму миттєвого деформування; $K(t-\tau)$ – ядро повзучості; $R(t-\tau)$ – ядро релаксаци; λ – реологічний параметр ($\lambda > 0$); t – час спостереження; τ – час, що передує моменту спостереження.

В (1) на відміну від базової нелінійної спадкової моделі, запропонованої в [8], функція $\varphi_0(\cdot)$ використовується не тільки при $t = 0$, але і для всіх значень $t > 0$. Функція $\varphi_0(\varepsilon)$ задається одночленною степеневою апроксимацією

$$\varphi_0(\varepsilon) = \frac{H}{q} (\varepsilon)^q, \quad (2)$$

де H , q – константи, що визначаються по результатах обробки експериментальних даних випробувань зразків матеріалу на одновісний розтяг.

Дробово-експоненційне ядро, запропоноване в [6], задається співвідношенням

$$K(t-\tau) = \frac{1}{(t-\tau)^{-\alpha}} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-\beta)^n (t-\tau)^{(1+\alpha)n}}{\Gamma[(1+\alpha)(1+n)]} \quad (3)$$

для випадку повзучості і співвідношенням

$$R(t-\tau) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{-(\lambda + \beta)^n \cdot (t-\tau)^{(1+\alpha)(1+n)}}{\Gamma[1 + (1+\alpha)(1+n)]} \quad (4)$$

для випадку релаксації. Де α і β – параметри дробово-експоненційного ядра причому $-1 < \alpha < 0$, а $\beta > 0$.

Параметри α і β дробово-експоненційного ядра, а також реологічний параметр λ у рівнянні (1) визначаються по результатах обробки експериментальних даних на одновісну повзучість при фіксованій температурі

і при декількох рівнях постійних напружень. В цьому випадку величина напруження $\sigma(t)$ задається співвідношенням

$$\sigma(t) = h(t)\sigma_k; \quad (k = \overline{1, m}), \quad (5)$$

де $h(t)$ – одинична функція Хевісайда ($h(t) = 0$ при $t < 0$ і $h(t) = 1$ при $t \geq 0$), а $\sigma_k = const$.

В роботі в рамках рівнянь (1) розв'язується задача із розрахунку деформацій повзучості для склопластику ТС8/3-250 при розтягненні під кутом $\varphi = 45^\circ$ до осі симетрії і фторопласту-4. Результати розрахунку порівнюються з експериментальними даними, запозиченими із [9, 10]. Задача включає побудову визначальних рівнянь повзучості, визначення області нелінійності в'язкопружних властивостей матеріалів, визначення параметрів дробово-експоненційних ядер спадковості, та експериментальну апробацію моделі на прикладі розрахунку релаксації напружень та деформацій повзучості при одноразовому статичному навантаженні.

Побудова визначального рівняння повзучості нелінійних в'язкопружних матеріалів. Відомо, що характер нелінійності процесу повзучості в'язкопружних матеріалів і структура відповідних нелінійних моделей повзучості залежить від виконання однієї із умов подібності. В якості таких умов найчастіше розглядається подібність первинних кривих повзучості і подібність ізохронних діаграм повзучості.

Нелінійність в'язкопружних властивостей матеріалів проявляється, як відомо [6], у порушенні умови суперпозиції і умови однорідності. В результаті залежність "деформація – час" не може бути представлена у вигляді ряду ступінчастих функцій, що задаються в різні моменти часу, а функція повзучості виявляється залежною від напружень.

Нелінійність в'язкопружних властивостей вибраних матеріалів обґрунтовується в роботі виходячи із порушення умови однорідності, коли в довільний фіксований момент часу відношення між деформаціями не відповідає відношенню між напруженнями. В цьому випадку функції повзучості $J_k(t)$

$$J_1(t) = \frac{\varepsilon(t, \sigma_1)}{\sigma_1} \neq J_2(t) = \frac{\varepsilon(t, \sigma_2)}{\sigma_2} \neq \dots \neq J_m(t) = \frac{\varepsilon(t, \sigma_m)}{\sigma_m} \quad (6)$$

виявляються залежними від рівня напружень σ_k так, що єдина функція повзучості $J(t)$, інваріантна по відношенню до рівня напружень σ_k , відсутня.

Кількісна оцінка нелінійності в'язкопружних властивостей матеріалів може бути отримана із співставлення розрахункових $t_{\alpha, k}$ і табличних $t_{\alpha, k}^*$ значень квантиля статистики [11]. Вважається, що матеріал володіє нелінійними в'язкопружними властивостями, якщо виконується умова [12]

$$t_{\alpha,k} = \frac{\delta \bar{J}(t_j) \sqrt{n}}{S_j(t_j)} < t_{\alpha,k}^*, \quad j = \overline{1, m}, \quad (7)$$

де $\bar{J}(t_j)$ – вибіркове середнє значення функції повзучості; $S_j(t_j)$ – середнє квадратичне відхилення величини $\bar{J}(t_j)$; n – об’єм вибірки (кількість функцій повзучості); δ – максимальна похибка між значеннями $J_k(t_j)$ і $\bar{J}(t_j)$.

Величина похибки δ в подальших розрахунках задається $\pm 5\%$, а ймовірність p попадання експериментальних функцій повзучості $J_k(t_j)$ в інтервал, обмежений величиною $\delta = \pm 5\%$, по відношенню до величини $\bar{J}(t_j)$ повинен бути не менше 90%.

Експериментальні значення податливості нанесені на рис. 1 для склопластику ТС8/3-250 при розтягненні під кутом $\varphi = 45^\circ$ до осі симетрії (а), та фторопласту-4 (б). Експериментальні значення податливості для склопластику ТС8/3-250 отримані із даних випробувань на повзучість при напруженнях $\sigma_k = 20,3$ (○), 39,8 (⊖), 59,7 (⊕), 79,6 (●), 99,5 (⦿), 119,4 (⦿) МПа і для фторопласту-4 – при напруженнях $\sigma_k = 5$ (○), 7,5 (⊖), 8,5 (⊕), 10 (●). Експериментальні дані запозичені із [9] і [10]. Штриховими лініями нанесені границі інтервалу $\delta_{\max} = \pm 5\%$ від величини $\bar{J}(t_j)$.

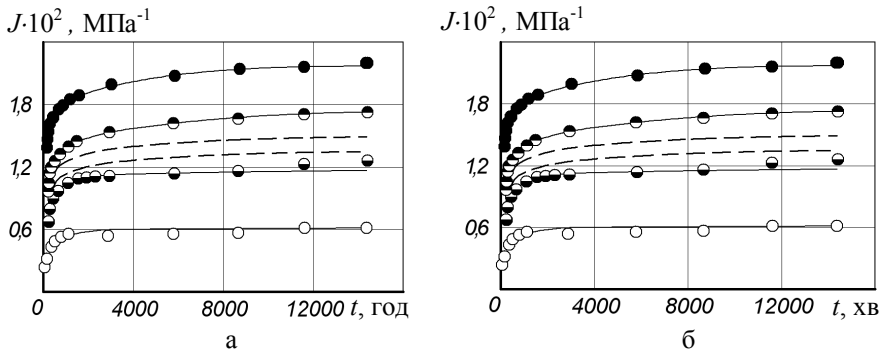


Рис. 1.

Розрахункові значення квантиля статистики $t_{\alpha,k}$, нанесені тонкими штриховими лініями, також не перевищують (рис. 2) для цих напружень їх критичні значення $t_{\alpha,k}^*$, нанесені товстими суцільними лініями.

Із даних приведених на рис. 1, видно, що в інтервали $2\delta_{\max} \bar{J}(t_j)$ попадають експериментальні значення функцій повзучості для досить

обмеженого рівня напружень. Розрахункові значення квантеля статистики $t_{\alpha,k}$ менші їх критичного значення $t_{\alpha,k}^*$, що в цілому задовольняє умовам нелінійності (6) и (7).

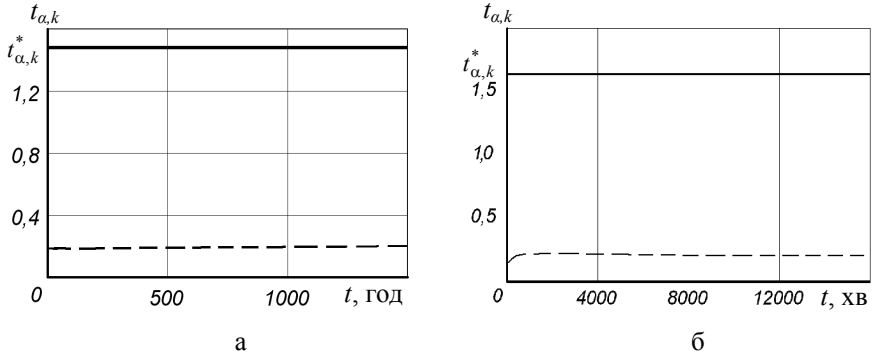


Рис. 2.

Для побудови визначального нелінійного рівняння повзучості (1) використана концепція єдиної ізохронної діаграми деформування, яка обґрунтовується експериментально виходячи із умови подібності ізохронних діаграм повзучості і діаграми миттєвого деформування.

Узагальнену умову подібності ізохронних діаграм повзучості, яка містить і діаграму миттєвого деформування, представимо у вигляді [12]

$$\varphi_t[\varepsilon_i(t), t_j] = \frac{\varphi_0(\varepsilon_i)}{1 + G(t_j)} \Rightarrow 1 + G(t_j) = \frac{\varphi_0(\varepsilon_i)}{\varphi_t[\varepsilon_i(t), t_j]} = const, \quad (8)$$

що задає подібність в площині "φ-ε" для кожного із фіксованих рівнів деформацій $\varepsilon_i(t)$ в інтервалі $i = \overline{1, \ell}$ по параметру t_j . Тут $1 + G(t_j)$ – функція подібності; $\varphi_0(\cdot)$ і $\varphi_t[\cdot]$ – значення напружень, що визначаються із діаграми миттєвого деформування і по ізохронних діаграмах повзучості для кожного із моментів часу t_j ; ε_i – компонента деформації, що не залежить від часу t_j , і визначається по діаграмі миттєвого деформування $\varphi_0(\varepsilon_i)$.

Вважається, що єдина ізохронна діаграма деформування $\varphi(\varepsilon)$ існує з похибкою δ по відношенню до вибіркового середнього $\overline{\varphi}(\varepsilon)$, якщо виконується нерівність

$$\frac{|\overline{\varphi}(\varepsilon_i) - \varphi_0(\varepsilon_i)|}{\varphi_0(\varepsilon_i)} \leq \delta, \quad (9)$$

а інтервал

$$\overline{\varphi}(\varepsilon_i) - \delta \overline{\varphi}(\varepsilon_i) < \varphi(\varepsilon) < \overline{\varphi}(\varepsilon_i) + \delta \overline{\varphi}(\varepsilon_i); \quad (i = \overline{1, \ell}) \quad (10)$$

накриває істинне значення єдиної ізохронної діаграми деформування $\varphi(\varepsilon)$ із деякою ймовірністю p .

Значення ймовірності p залежить від значення квантиля статистики $t_{\alpha,k}$ і визначається із таблиць [11]. Значення функції подібності $1+G(t_j)$, а також значення величин $\overline{\varphi}(\varepsilon_i)$ і $t_{\alpha,k}$ розраховуються за відомою методикою [12].

Єдині ізохронні діаграми деформування для склопластику ТС8/3-250 при розтягненні під кутом $\varphi = 45^\circ$ до осі симетрії (а) і фторопласту-4 (б) обґрунтовані експериментально, виходячи із виконання умов (9) і (10), та приведені на рис. 3. Вихідні ізохронні діаграми повзучості задані квадратами, товстими суцільним лініями показані діаграми миттєвого деформування $\varphi_0(\varepsilon)$. Для склопластику ТС8/3-250 (а) точки відповідають моментам часу $t_j = 54(\square)$, 198 (\blacksquare), 348 (\blacksquare), 510 (\blacksquare), 978 (\blacksquare), 1200 (\blacksquare) годин, для фторопласту-4 (б) точки відповідають моментам часу $t_j = 234(\square)$, 1849 (\blacksquare), 4362 (\blacksquare), 6517 (\blacksquare), 8491(\blacksquare), 10646(\blacksquare), 13518 (\blacksquare) хвилин.

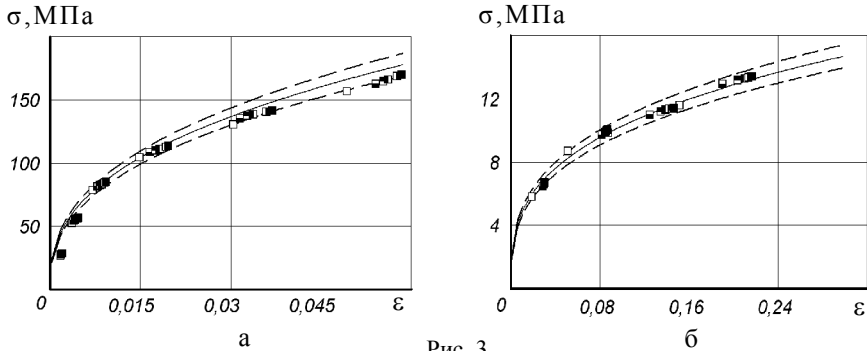


Рис. 3.

Диференціюючи рівняння (1) по часу, отримаємо визначальне рівняння моделі

$$\frac{d\varepsilon(t)}{dt} = \frac{d}{dt} \left[\sigma(t) + \int_0^t K(t-\tau) \sigma(\tau) d\tau \right] \left[\frac{d\varphi_0(\varepsilon(t))}{d\varepsilon} \right]^{-1}, \quad (11)$$

де похідна від функції $\varphi_0(\varepsilon(t))$ взята, як похідна від складної функції. Рівняння нелінійної повзучості (8) є рівнянням швидкісного типу і встановлює в найбільш загальному вигляді залежність швидкості повзучості від напруження, вихідних деформативних властивостей матеріалу і враховує спадкові властивості у формі інтегрального часового оператора.

Із врахуванням (2) з моделі (8) отримуємо співвідношення

$$\frac{d\varphi_0(\varepsilon(t))}{d\varepsilon(t)} = \frac{H}{(\varepsilon(t))^{1-q}}, \quad (12)$$

із врахуванням якого отримаємо визначальне рівняння нелінійної моделі повзучості в'язкопружних матеріалів (8), що запишеться у вигляді

$$\frac{d\varepsilon(t)}{dt} = \frac{d}{dt} \left[\sigma(t) + \int_0^t K(t-\tau) \sigma(\tau) d\tau \right] \left[\frac{H}{(\varepsilon(t))^{1-q}} \right]^{-1}. \quad (13)$$

Визначення параметрів моделі. В роботі невідомі параметри α , β і λ визначаються із даних, отриманих із умови існування єдиної ізохронної діаграми миттєвого деформування і представлених у вигляді функції подібності $1 + G(t_j)$.

В якості критерію найкращого узгодження функції подібності (8) із експериментальними даними використовується умова мінімізації квадратичного відхилення розрахункових даних із експериментальними даними функції подібності $(G(t_j))_{\text{exp}}$. Задача зводиться до знаходження мінімуму функціоналу

$$F(\alpha, \beta, \lambda) = \sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^N \left\{ G_{\text{exp}}(t_i) - \left[1 + \lambda \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-\beta)^n t_i^{(1+\alpha)(1+n)}}{\Gamma[1 + (1+n)(1+\alpha)]} \right] \right\}^2. \quad (14)$$

Мінімізація функціоналу (14) здійснюється із використанням ітераційного методу Лівенберга-Маркардта [13]. Значення знайдених таким чином параметрів α , β і λ для досліджуваних матеріалів приведені в табл.

Експериментальна апробація моделі. Найбільш обґрунтована експериментальна перевірка доцільності застосування нелінійної теорії в'язкопружності (1), застосування дробово-експоненційного ядра (3) і параметрів ядра, знайдених із даних на повзучість, здійснюється на задачі розрахунку деформацій повзучості та релаксації напружень.

Диференційне визначальне рівняння нелінійної повзучості (6) із врахуванням рівняння (3) для ядра спадковості конкретизується у вигляді

$$\frac{d\varepsilon^r(t)}{dt} = \sigma_k \frac{d}{dt} \left[h(t) \left[1 + \lambda \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-\beta)^n t^{(1+\alpha)(1+n)}}{\Gamma[1 + (1+\alpha)(1+n)]} \right] \right] \left[\frac{H}{(\varepsilon^r(t))^{1-q}} \right]^{-1}. \quad (15)$$

Інтегруючи далі (15) із врахуванням початкових умов для залежності деформацій повзучості ε від напруження σ і часу t отримуємо рівняння

$$\varepsilon(t) = \left(\frac{q\sigma_k}{H} \right)^{\frac{1}{q}} \left(1 + \lambda \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-\beta)^n t^{(1+\alpha)(1+n)}}{\Gamma[1 + (1+\alpha)(1+n)]} \right)^{\frac{1}{q}}, \quad (16)$$

де прийнято, що $\tau = 0$, $t - \tau = t$, а $h(0) = 1$.

Значення деформацій повзучості $\varepsilon(t)$ нелінійно в'язкопружних матеріалів розрахованих по співвідношенню (16) із використанням значень параметрів α , β і λ , приведених у табл., співставлені на рис. 4 із експериментальними даними для склопластику ТС8/3-250 при розтягненні під кутом $\varphi = 45^\circ$ до осі симетрії (а) і фторопласту-4 (б). Результати розрахунку нанесені штриховими лініями, а експериментальні дані показані точками. Позначення рівнів прикладених напружень σ_k співпадають із прийнятими на рис. 1.

Таблиця

В'язкопружні матеріали	Параметри ядра			Параметри діаграми миттєвого деформування	
	α	β , год $^{-(1+\alpha)}$	λ , год $^{-(1+\alpha)}$	H , МПа	q
склопластик ТС8/3-250, $\varphi = 45^\circ$	-0,7	-0,12	0,11	540,46	0,3917
фторопласт-4	-0,703	-0,13	0,062	21,806	0,3264

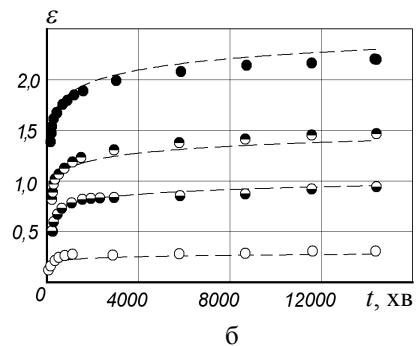
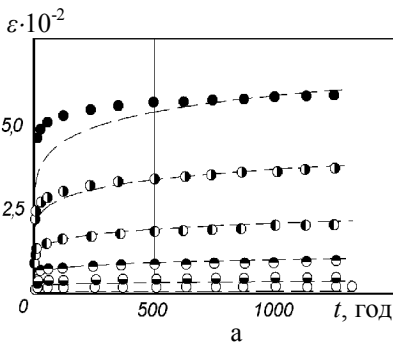


Рис. 4.

Залежність напруження σ_k від часу t , виходячи із (1) із врахуванням (4) записується у вигляді

$$\sigma_k(t) = \sigma_0 \left[1 - \lambda \sum_{n=0}^{\infty} \frac{-(\lambda + \beta)^n t^{(1+\alpha)(1+n)}}{\Gamma[1 + (1 + \alpha)(1 + n)]} \right], \quad (17)$$

де, прийнято, що $\tau = 0$, $t - \tau = t$, а $h(0) = 1$.

Криві релаксації напружень, розраховані по рівнянню (1) із використанням значень параметрів α , β і λ , знайдених із дослідів на повзучість (таблиця), співставлені на рис. 5 із експериментальними даними для склопластику ТС8/3-250 при розтягненні під кутом $\varphi = 45^\circ$ до осі симетрії із експериментальними даними. Початкове значення напружень для склопластика ТС8/3-250 складає $\sigma_k(0) = 59,72$ (○), 79,63 (◐) і 99,5 (●) МПа. Результати розрахунків нанесені штриховими лініями, а експериментальні дані точками. Експериментальні дані запозичені [14].

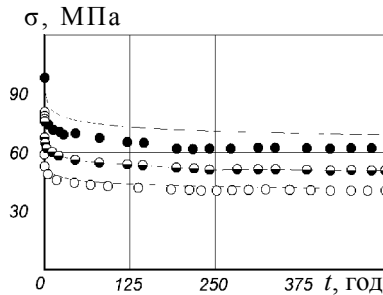


Рис. 5.

В цілому, як видно із рис. 5, ядро релаксації (4) резольвента вихідного дробово-експоненційного ядра (3) і параметри ядра α , β і λ , знайдені із дослідів на повзучість, забезпечують повністю задовільне узгодження результатів розрахунку релаксації напружень із експериментальними даними.

Висновок. Як видно із результатів розрахунку на рис. 4, 5 отримано задовільне узгодження експериментальних даних із розрахунковими. Що підтверджує доцільність застосування нелінійної моделі, що будується на підставі гіпотези єдиної діаграми деформування виходячи із подібності ізохронних діаграм повзучості та діаграми миттєвого деформування, для розрахунку релаксації напружень та деформацій повзучості. Найбільша похибка була отримана для склопластику ТС8/3-250 при розтягненні під кутом $\varphi = 45^\circ$ до осі симетрії при розрахунку деформацій повзучості при одноразовому статичному навантаженні і становить 15%.

Список літератури: 1. Ильющин А.А. К вопросу о нелинейной теории вязкоупругости / А.А. Ильющин, Б.Е. Победря // В сб.: Прочность и пластичность. – М.: Наука, 1971. – С. 270-276. 2. Каминский А.А. Механика разрушения полимеров / А.А. Каминский, Г.В. Гаврилов. – К.: Наукова думка, 1988. – 224 с. 3. Колтунов М.А. Ползучесть и релаксация / М.А. Колтунов. –

М: Высшая школа, 1976. – 278 с. 4. Колтунов М.А. К вопросу исследования одномерной задачи нелинейной ползучести / М.А. Колтунов, А.С. Николаевский // Механика полимеров. – 1966. – № 5. – С. 678-687. 5. Работнов Ю.Н. Равновесие упругой среды с последствием / Ю.Н. Работнов // Прикл. математика и механика. – 1948. – Т. 12. – № 1. – С. 53-62. 6. Работнов Ю.Н. Элементы наследственной механики твердых тел / Ю.Н. Работнов. – М.: Наука, 1977. – 384 с. 7. Golub V.P. An Approach to Construction a Rheological Model of a Strain-Hardening Medium / V.P. Golub, Y.M. Kobzar, P.V. Fernati // Int. Appl. Mech. – 2004. – Vol. 40. – № 7. – P. 776–784. 8. Работнов Ю.Н. Некоторые вопросы теории ползучести / Ю.Н. Работнов // Вестник Московского университета. – 1948. – № 10. – С. 81-91. 9. Работнов Ю.Н. Нелинейная ползучесть стеклопластика ТС8/3-250 / Ю.Н. Работнов, А.Х. Паперник, Е.И. Степанычев // Механика полимеров. – 1971. – № 3. – С. 391-397. 10. Павлов П.А. Ползучесть полиэтилена при плоском напряженном состоянии в условиях нестационарного нагружения / П.А. Павлов, О.Н. Кондакова, В.Н. Белан-Гайко // Механика композитных материалов. – 1980. – № 5. – С.793-801. 11. Степнов М.Н. Статистическая обработка результатов механических испытаний / М.Н. Степнов. – М.: Машиностроение, 1972. – 232 с. 12. Голуб В.П. Нелинейная ползучесть вязкоупругих органических волокон при растяжении / В.П. Голуб, Ю.М. Кобзарь, П.В. Фернати // Прикл. механика. – 2005. – Т. 41. – № 7. – С. 102–115. 13. More J.J. Users guide to minipack / J.J. More, B.S. Garbow, K.E. Hillstom // Argonne National Laboratory Publication ANL-80-74. – 1980. – 238 p. 14. Работнов Ю.Н. Приложение нелинейной теории наследственности к описанию временных эффектов в полимерных материалах / Ю.Н. Работнов, А.Х. Паперник, Е.И. Степанычев // Механика полимеров. – 1971. – № 1. – С. 74-87.

Стаття представлена д.т.н проф. Інституту механіки ім. С.П. Тимошенка НАН України Голубом В.П.

УДК 539.376

Моделирование процессов ползучести на основе нелинейной теории вязкоупругости с независимой от времени нелинейностью / Павлюк Я.В. // Вестник НТУ "ХПИ". Тематический выпуск: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2010. – № 21. – С. 126 – 135.

Рассмотрена задача построения одномерных определяющих уравнений нелинейной теории вязкоупругости. Решение получено на основе гипотезы единой диаграммы деформирования исходя из подобия изохронных диаграмм ползучести и диаграммы мгновенного деформирования. Построено обобщенную реологическую модель. На основе модели получены одномерные определяющие уравнения ползучести для нелинейно-вязкоупругих материалов. Илл.: 5. Библиогр.: 14 назв.

Ключевые слова: нелинейная теория вязкоупругости, единая диаграмма деформирования, изохронные диаграммы ползучести, диаграмма мгновенного деформирования, реологическая модель, ползучесть, нелинейно-вязкоупругие материалы.

UDC 651.326

The creep processes modeling by nonlinear theory of viscoelasticity with time independent nonlinearity / Pavluyk Y.V. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkiv: NTU "KhPI". – 2010. – № 21. – P. 126 – 135.

The problem of the derivation of unidimensional constitutive equations of nonlinear viscoelastic theory is considered. The solution is obtained based on the hypothesis of the unified deformation diagram proceeding from the similarity of isochronous creep diagrams and a stress-strain diagram. A generalized reological model is constructed. On the basis of the generalized model unidimensional creep constitutive equations of nonlinear viscoelastic materials have been constructed. Figs: 5. Refs: 14 titles.

Keywords: nonlinear theory of viscoelasticity, unified deformation diagram, isochronous creep diagrams, stress-strain diagram, reological model, creep, nonlinear viscoelastic materials.

Поступила в редакцію 10.10.2009